

文章编号: 2095-4980(2018)06-0989-08

## 无线通信中跟踪干扰信号检测方法及其检测性能

夏 志<sup>1</sup>, 陈建忠<sup>2</sup>, 牛英滔<sup>2</sup>, 韩 晨<sup>1</sup>, 逢天洋<sup>1</sup>

(1.陆军工程大学 通信工程学院, 江苏 南京 210007; 2.南京电讯技术研究所, 江苏 南京 210007)

**摘 要:** 根据跟踪干扰随通信信号变频的特征, 提出一种检测跟踪干扰的方法。该方法对空闲信道采用能量检测法进行检测, 对通信信道采用在信号中插入训练序列进行检测, 根据干扰是否连续多次伴随信号出现、消失来判断系统是否受到跟踪干扰, 并推导出该方法在加性高斯白噪声(AWGN)信道条件下的检测概率。通过对该方法进行计算机仿真, 计算出不同仿真条件下的检测概率, 验证了该方法的正确性和有效性。理论分析和仿真结果表明, 信道改变次数越多, 检测结果的可信度越高, 但检测概率越低; 在低信干比条件下, 仿真检测概率与理论值较为符合, 在高信干比条件下, 检测性能受信噪比影响较大。

**关键词:** 跟踪干扰; 能量检测; 训练序列; 干扰检测

中图分类号: TN973.3

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.0989

## Performance analysis of a detection method for follower jamming in wireless communication

XIA Zhi<sup>1</sup>, CHEN Jianzhong<sup>2</sup>, NIU Yingtao<sup>2</sup>, HAN Chen<sup>1</sup>, PANG Tianyang<sup>1</sup>

(1.Communication Engineering College, Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu 210007, China;

2.Nanjing Telecommunication Technology Institute, Nanjing Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of follower jamming which changes frequency with the communication signal, a method to detect follower jamming is proposed. The method uses the energy detection approach to detect the unused channel and detect the communication channel by inserting a training sequence into the signal. According to whether the jamming continuously appears or disappears with the communication signal many times, it can judge whether the system is subjected to follower jamming. In addition, the detection probability in Additive White Gaussian Noise(AWGN) channel is derived. Through the computer simulation of the proposed method, the detection probability under different simulation conditions is calculated, which verifies the correctness and effectiveness of the method. The theoretical analysis and simulation results show that the more number of channel changes, the higher credibility of the test result, but the lower detection probability. Under the condition of low signal-to-jamming ratio, the simulation detection probability is consistent with the theoretical value, and the detection performance is greatly affected by the channel noise under the condition of high signal-to-jamming ratio.

**Keywords:** follower jamming; energy detection; training sequence; jamming detection

军事无线通信因其在战争中有着无可替代的移动性和灵活性, 可实现随时随地传输信息, 已成为支撑信息化战争的关键手段。但战场电磁环境较为复杂恶劣, 军事无线通信易受敌方恶意干扰, 严重影响通信的可靠性与有效性。敌方恶意干扰主要有固定干扰和动态干扰, 其中跟踪式干扰是典型动态干扰样式。由于跟踪干扰力图与通信信号在频域、时域和波形上保持一致, 与通信信号相关性强, 因此其干扰效率高, 对通信信号威胁大。故对跟踪干扰的准确检测将有助于军事无线通信系统采取有针对性的抗干扰策略, 具有重要的意义<sup>[1]</sup>。

目前已有部分文献对抗跟踪干扰技术进行了研究, 如文献[2]提出了 2 种利用通信信号到达时间和干扰到达时间的差异来对天线调零, 从而消除跟踪干扰的方法; 文献[3]提出了一种利用跟踪干扰提高接收机正确输出符

号的概率的方法,从而提高了通信性能;文献[4]提出了一种在慢 FH/MFSK 系统中,基于最大似然(Maximum Likelihood, ML)准则抑制跟踪干扰的方法;文献[5]提出了一种抗干扰部分规则低密度奇偶校验码来对抗跳频通信中的跟踪干扰;文献[6]提出一种基于信道质量优化的动态频谱抗干扰技术,通过对信道进行频谱感知和频谱预测,并将两者决策结果进行融合,使用户可动态地接入空闲进行数据传输。虽然目前已有部分抗跟踪干扰的技术和方法,但如何准确检测环境中的跟踪干扰并进而采取有针对性抗干扰措施仍然缺乏研究。文献[7]以跳频——高斯滤波最小频移键控通信系统为载体,研究了跳频通信系统的跟踪干扰检测问题;文献[8]中提出了利用能量检测法对跳频通信系统中的跟踪干扰进行检测,但通信信号和噪声能量对该方法检测性能影响较大;文献[9]对受跟踪干扰的跳频 Ad-Hoc 网络驻留时间随机时的性能进行了分析。如何可靠地检测跟踪干扰的存在是本文主要研究的内容。

针对上述问题,本文首先提出了一种基于多信道检测的跟踪干扰检测方法,然后对跟踪干扰的检测性能进行了推导,最后对算法的有效性进行了仿真实验。

## 1 系统模型

为便于研究,对算法条件作出以下假设:

1) 通信频谱被划分为  $N$  个在频域上互不重叠的信道,每个信道带宽为  $W_{ch}$ ,通信频谱带宽为  $W = NW_{ch}$ 。信道状态分为 2 种:当通信方使用某信道进行通信时,该信道为通信信道;当信道未被使用时,为空闲信道。

2) 无线通信系统具备独立于接收信道的宽带检测器,其检测带宽为  $W$ ,并可检测这  $N$  个信道内的能量值,每次检测时长为  $T_d$ ,每次检测采样点数为  $NL$  点。

3) 无线通信系统在通信信号内插入训练序列,即一段对于收发两端已知的序列,从而可通过对训练序列的检测来确定通信信道的受扰情况。

4) 跟踪干扰瞬时带宽满足  $W_f = W_{ch}$ ;当在某一信道上通信信号出现时,干扰机可瞬时侦察到通信信号并立即在该信道上释放出干扰信号;当该信道上通信信号消失时,干扰信号也立即消失,干扰相对于通信信号的时延忽略不计。

5) 通信信号在传输过程中,在每个信道驻留时间为  $T = nT_d$ ,即驻留时间为  $T_d$  的整数倍。假设收发两端的信道切换信息可以无错地通知发方,若未检测出存在跟踪干扰,则不改变传输信道;若检测出受到干扰,则将通信信道切换到未受干扰的信道上继续传输。

接收端接收的信号为:

$$r(t) = as(t) + bJ(t) + W(t) \quad (1)$$

式中:  $a=1$  和  $0$  分别表示接收信号中存在和不存在通信信号;  $b=1$  和  $0$  分别表示接收信号存在和不存在干扰信号;  $s(t)$  表示通信信号;  $J(t)$  表示干扰信号;  $W(t)$  为信道中的加性高斯白噪声(AWGN),其方差为  $\sigma_w^2$ 。

$s(t)$  采用 BPSK 调制,表达式为:

$$s(t) = \sqrt{2}\alpha_s \cos[2\pi f_c t + d_0\pi] \quad (2)$$

式中:  $\sqrt{2}\alpha_s$  为通信信号幅度;  $f_c$  表示通信信号载频;  $d_0 \in [0,1]$  表示信息符号。

$J(t)$  为窄带高斯信号跟踪干扰,服从  $N(0, \sigma_j^2)$  分布,表达式为:

$$J(t) = \text{Filter}[n_j(t), f_c] \quad (3)$$

式中:  $\text{Filter}[\bullet]$  表示对信号进行窄带滤波;  $n_j(t)$  表示零均值 AWGN,其等效单边功率谱密度为  $N_j$ ,且  $n_j(t)$  和  $W(t)$  相互独立;  $f_c$  表示与通信信号载波频率一致的窄带滤波器的瞬时中心频率。 $W(t)$  是均值为  $0$ ,方差  $\sigma_w^2$  的加性高斯白噪声,定义  $\sigma^2 = \sigma_w^2 + \sigma_j^2$  为噪声功率和干扰功率之和。

## 2 跟踪干扰检测算法

1) 计算目标频段的功率谱。在第  $j(j=1,2,\dots,M)$  次检测时, Neyman-Pearson(NP)能量检测器对目标频段进行功率谱计算。每次计算采用  $2NL$  个数据点,按修正周期图法计算功率谱,表达式如下:

$$P_j(f_k) = \frac{\frac{1}{N} \left| \sum_{l=0}^{2L-1} w(l)x[l]e^{-j2\pi f_k l} \right|^2}{\frac{1}{2L} \sum_{l=0}^{2L-1} |w(l)|^2} \quad k=1,2,\dots,NL \quad (4)$$

式中:  $w(l)$  为窗函数;  $L$  为功率谱点数。本文选用汉明窗。

2) 计算各信道中的能量。式(4)中得到的功率谱点数为  $NL$  点(实信号), 将功率谱按顺序等分为  $N$  段, 每段功率谱点数为  $L$ , 对应于一个信道。则第  $j$  次检测第  $i$  个信道中的能量可计算为:

$$E_{i,j} = \frac{W_{ch}}{L} \sum_{k=1}^L P_j \left( f_{[(i-1)L+k]} \right) = \frac{W}{NL} \sum_{k=1}^L P_j \left( f_{[(i-1)L+k]} \right) \quad (5)$$

3) 判断空闲信道是否受扰。将第  $i$  个空闲信道的能量值  $E_i$  与检测门限  $\gamma$  比较, 若  $E_i < \gamma$ , 则判定为该时刻  $i$  信道未受到干扰。

4) 判断通信信道是否受扰。对通信信号中的训练序列<sup>[1]</sup>进行检测, 根据检测到受干扰的位数, 通过与门限值  $K_1$  比较, 判断该信道是否受扰。

5) 通信传输信道连续  $M$  次改变时均受到干扰, 则判断该系统受到跟踪干扰。

跟踪干扰检测算法的基本流程如图1所示。

### 3 算法性能分析

#### 3.1 空闲信道干扰信号检测性能分析

无通信信号信道的干扰检测问题可视为二元假设的选择问题<sup>[10]</sup>, 根据 NP 定理构建 NP 检测器:

$$\begin{cases} H_0: x[n] = W[n], & n = 0, 1, \dots, L-1 \\ H_1: x[n] = W[n] + J[n], & n = 0, 1, \dots, L-1 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $H_0$  为假设观测值  $x[n]$  中只有噪声;  $H_1$  为假设观测值  $x[n]$  中既有干扰信号又有噪声。

根据模型假定, 在  $H_0$  假设条件下,  $x[n]$  服从均值为 0, 方差为  $\sigma_w^2$  的正态分布:

$$x[n] \sim N(0, \sigma_w^2) \quad (7)$$

在  $H_1$  假设条件下,  $x[n]$  服从均值为 0, 方差为  $\sigma^2 = \sigma_w^2 + \sigma_j^2$  的正态分布:

$$x[n] \sim N(0, \sigma^2) \quad (8)$$

$L$  次观测相互独立。根据 NP 定理, 构造似然比函数  $L(x)$ :

$$L(x) = \frac{p(x|H_1)}{p(x|H_0)} > \gamma \quad (9)$$

式中:  $p(x|H_1)$  表示在  $H_1$  假设下观测值的概率密度函数;  $p(x|H_0)$  表示在  $H_0$  假设下观测值的概率密度函数;  $\gamma$  为判决门限值。NP 检测器判为  $H_1$  假设, 判定存在干扰信号, 反之判为  $H_0$  假设, 判定没有干扰信号。即:

$$L(x) = \frac{\frac{1}{[2\pi(\sigma^2)]^{\frac{L}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(\sigma^2)} \sum_{n=0}^{L-1} x^2[n] \right\}}{\frac{1}{(2\pi\sigma_w^2)^{\frac{L}{2}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_w^2} \sum_{n=0}^{L-1} x^2[n] \right\}} > \gamma \quad (10)$$

两边取对数:

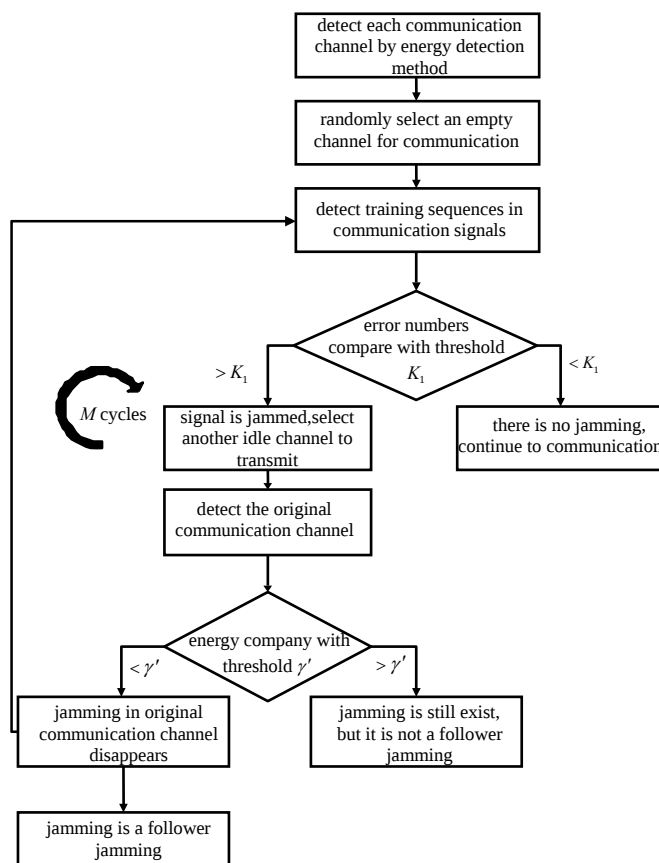


Fig.1 Flow of a follower jamming detection method  
图1 跟踪干扰检测方法流程图

$$\ln L(x) = \frac{L}{2} \ln \left( \frac{\sigma_w^2}{\sigma^2} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_w^2}{\sigma^2} - \frac{1}{\sigma_w^2} \right) \sum_{n=0}^{L-1} x^2[n] > \ln \gamma \quad (11)$$

去掉与观测值无关的常量, 可得检测量  $T(x)$  为:

$$T(x) = \sum_{n=0}^{L-1} x^2[n] \quad (12)$$

如果  $T(x)$  超过新门限值  $\gamma'$ :

$$T(x) = \sum_{n=0}^{L-1} x^2[n] > \gamma' \quad (13)$$

$$\gamma' = \frac{2\sigma_w^2(\sigma^2)}{\sigma^2 - \sigma_w^2} \ln \gamma - \frac{L\sigma^2\sigma_w^2}{\sigma^2 - \sigma_w^2} \ln \frac{\sigma_w^2}{\sigma^2} \quad (14)$$

则判为  $H_1$  假设成立, 判定存在干扰信号。

$x[n]$  服从高斯分布:

$$x[n] \sim \begin{cases} N(0, \sigma_w^2) & \text{在 } H_0 \text{ 条件下} \\ N(0, \sigma^2) & \text{在 } H_1 \text{ 条件下} \end{cases} \quad (15)$$

$T(x)$  是  $L$  个独立同分布的高斯随机变量的平方和。在  $H_0$  条件下,  $T/\sigma_w^2$  服从中心化的卡方分布, 而在  $H_1$  条件下,  $T/\sigma^2$  服从中心化的卡方分布:

$$\begin{cases} \frac{T}{\sigma_w^2} \sim \chi_L^2 & \text{在 } H_0 \text{ 条件下} \\ \frac{T}{\sigma^2} \sim \chi_L^2 & \text{在 } H_1 \text{ 条件下} \end{cases} \quad (16)$$

中心化卡方分布用  $\chi_\nu^2$  表示, 其中  $\nu$  表示自由度, 其概率密度函数由  $x$  的概率密度函数确定。 $x = \sum_{i=1}^{\nu} x_i^2$ ,  $x_i \sim N(0,1)$  且  $x_i$  是独立同分布的。卡方分布的概率密度函数定义为:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{2^{\frac{\nu}{2}} \Gamma(\frac{\nu}{2})} x^{\frac{\nu}{2}-1} \exp\left(-\frac{1}{2}x\right), & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中  $\Gamma(u)$  是伽马函数, 定义为:

$$\Gamma(u) = \int_0^\infty t^{u-1} \exp(-t) dt \quad (18)$$

定义  $\chi_\nu^2$  在  $[x, \infty]$  区间内的概率积分为  $Q_{\chi_\nu^2}$ :

$$Q_{\chi_\nu^2} = \int_x^\infty p(t) dt \quad (19)$$

$$Q_{\chi_\nu^2} = \begin{cases} 2Q(\sqrt{x}), & \nu=1 \\ 2Q(\sqrt{x}) + \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}x\right)}{\sqrt{\pi}} \sum_{k=0}^{\frac{\nu-1}{2}} \frac{(k-1)!(2x)^{k-\frac{1}{2}}}{(2k-1)!}, & \nu > 1 \text{ 且为奇数} \\ \exp\left(-\frac{1}{2}x\right) \sum_{k=0}^{\frac{\nu-1}{2}} \frac{\left(\frac{x}{2}\right)^k}{k!}, & \nu > 1 \text{ 且为偶数} \end{cases} \quad (20)$$

式中  $Q(x)$  为互补累积分布函数, 其定义如下:

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}t^2\right) dt = 1 - \Phi(t) \quad (21)$$

式中  $\Phi(t)$  为服从  $N(0,1)$  分布的随机变量的概率密度函数。

实际没有干扰, 但是检测到干扰存在的虚警概率  $P_{FA}$ :

$$P_{FA} = P_r\{T(x) > \gamma' | H_0\} = \int_{\gamma'}^{\infty} p(x | H_0) dx = Q_{\chi^2_L} \left( \frac{\gamma'}{\sigma_w^2} \right) \quad (22)$$

检测门限值  $\gamma'$  由给定的虚警概率计算得出:

$$\gamma' = \sigma_w^2 Q_{\chi^2_L}^{-1}(P_{FA}) \quad (23)$$

实际不存在干扰并且经正确的检测判定为不存在干扰的检测概率  $P_{d1}$  为:

$$P_{d1} = P_r\{T(x) < \gamma' | H_0\} = 1 - P_r\{T(x) > \gamma' | H_0\} = 1 - Q_{\chi^2_L} \left( \frac{\gamma'}{\sigma_w^2} \right) \quad (24)$$

### 3.2 通信信道干扰信号检测性能分析

确定 2 个假设  $H_0$  代表无干扰为真,  $H_1$  代表受干扰为真。对观测空间中子样个数为  $M$  的每个观测值  $(r_1, r_2, \dots, r_M)$ , 计算它们的似然比  $A(r)$ , 并与某个固定门限  $\Theta$  作比较<sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned} A(r) > \Theta, & \text{判} H_0 \text{为真} \\ A(r) < \Theta, & \text{判} H_1 \text{为真} \end{aligned} \quad (25)$$

式中:

$$A(r) = \frac{p(r | H_0)}{p(r | H_1)}, \quad \Theta = \frac{P_1(C_{01} - C_{11})}{P_0(C_{10} - C_{00})} \quad (26)$$

式中:  $P_0, P_1$  分别为  $H_0, H_1$  出现的概率。假设干扰方对于通信信号的检测概率为 90%, 漏检概率为 10%, 检测到通信信号后立即发射干扰信号。因此在通信信道中  $P_0=0.1, P_1=0.9$ ;  $p(r | H_0)$  和  $p(r | H_1)$  为对应的 2 个转移概率密度;  $C_{ij}(i, j=0,1)$  为代价函数。  $C_{10}$  为无干扰, 判为有干扰的代价。此时系统将立即切换到其他信道上进行通信, 若切换时间为检测时间的 10%, 则此时代价为 0.1, 即  $C_{10}=0.1$ 。  $C_{01}$  为有干扰判为无干扰的代价。若将有干扰信道误判为无干扰信道, 在该信道上进行通信时, 通信将会中断, 故设  $C_{01}=1$ 。由此可以看出, 将受扰信道误判为未受扰信道, 系统代价较大; 将未受扰信道误判为受扰信道, 系统代价较小。  $C_{00}$  为无干扰且正确判决的代价, 此时系统就在该信道进行通信, 故  $C_{00}=0$ 。  $C_{11}$  为有干扰且正确判决的代价, 此时系统只需付出切换信道的代价, 故  $C_{11}=0.1$ 。

此时, 判决准则变为:

$$A(r) = \frac{p(r | H_0)}{p(r | H_1)} \underset{H_1}{\overset{H_0}{>}} \frac{P_1(1-0.1)}{P_0(0.1-0)} \quad (27)$$

可得到如下等价关系:

$$P_0 p(r | H_0) \underset{H_1}{\overset{H_0}{>}} 9 P_1 p(r | H_1) \quad (28)$$

由此可推得最终的等价判决关系:

$$P(H_0 | r) \underset{H_1}{\overset{H_0}{>}} 9 P(H_1 | r) \quad (29)$$

式(28)中左边和右边分别为观察  $r \in (r_1, r_2, \dots, r_M)$  已经出现的条件下, 假设  $H_0$  和  $H_1$  分别为真的概率, 因此按最小平均代价的贝叶斯准则在当前情况下变为最大后验概率准则, 且  $P(H_0 | r) + P(H_1 | r) = 1$ , 故上式等价于:

$$P(H_1 | r) \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} 0.1 \quad (30)$$

在通信信号内插入训练序列, 从而可感知通信信道的受扰情况。设训练序列长度为  $K$ , 受干扰时的检测门限为  $K_1$ , 由式(30)得:  $K_1=0.1K$ 。

第  $r_j(j=1, 2, \dots, M)$  个观测值受干扰为真的概率为:

$$P_{d2} = P(H_1 | r_j) = \sum_{m=0}^{K-K_1} C_K^m P_e^m (1-P_e)^{K-m} \quad (31)$$

式中误码率  $P_e^{[12]}$  为:

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{P_R}{P_N + P_J}} \right) \quad (32)$$

式中:  $P_J$  为干扰信号功率;  $P_R$  为接收信号功率;  $P_N$  为噪声功率。

### 3.3 跟踪干扰检测性能

结合上文所述的不同信道状态下的检测性能,分别推导单次检测和  $M$  次检测的检测概率,分析将系统所受干扰判定为跟踪干扰的检测性能。单次检测定义为:对某空闲信道进行检测,当检测出该信道无干扰时,则在该信道进行通信,若通信过程中检测到干扰,则将通信信号换至其他空闲信道,并再对该信道进行检测,看干扰是否仍存在。

#### 1) 单次干扰检测概率:

假设通信系统遭受了跟踪干扰,则在通信前(0 时刻)检测第  $i$  个信道时应无干扰,建立通信后(1 时刻)该信道检测有干扰,待通信信道切换到其他信道后(2 时刻),该信道的干扰消失,故第  $i$  个信道跟踪干扰检测概率可表示为:

$$P_i = \overline{P_{i,0}} P_{i,1} \overline{P_{i,2}} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (33)$$

式中:  $\overline{P_{i,0}}$  为通信前检测  $i$  信道未受扰概率;  $P_{i,1}$  为通信时该信道的受扰概率;  $\overline{P_{i,2}}$  为通信信道切换至其他信道后该信道未受干扰概率。其中  $\overline{P_{i,0}}$  和  $\overline{P_{i,2}}$  都是信道中无干扰且正确检测无干扰的概率,即:

$$\overline{P_{i,0}} = \overline{P_{i,2}} = P_{d1} = 1 - Q_{\chi^2} \left( \frac{\gamma'}{\sigma_w^2} \right) \quad (34)$$

$P_{i,1}$  为信道中有干扰且正确检测到干扰的概率,故

$$P_{i,1} = P_{d2} = \sum_{m=0}^{K-K_1} C_K^m P_e^m (1 - P_e)^{K-m} \quad (35)$$

故:

$$P_i = \left[ 1 - Q_{\chi^2} \left( \frac{\gamma'}{\sigma_w^2} \right) \right]^2 \sum_{m=0}^{K-K_1} C_K^m P_e^m (1 - P_e)^{K-m} \quad (36)$$

#### 2) 通信系统跟踪干扰检测概率:

当连续改变  $M$  次信道后,信号一直受扰,则认为通信信号受到跟踪干扰,受到跟踪干扰的概率为:

$$P_d = \prod_{i=1}^M P_i \quad (37)$$

漏检概率指标  $P_m$  :

$$P_m = \sum_{k=0}^{M-1} C_N^k P_i^k (1 - P_i)^{N-k} \quad (38)$$

检测次数  $M$  可根据给定的漏检概率指标  $P_m$  由式(37)进行数值计算得到。

## 4 仿真及结果

仿真中设置采样频率  $F_s = 8 \text{ MHz}$ , 检测时间  $T_d = 0.01 \text{ s}$ , 通信频谱为  $2 \sim 4 \text{ MHz}$ , 带宽  $W = 2 \text{ MHz}$ , 划分为  $N = 10$  个信道, 每个信道带宽为  $W_{ch} = 200 \text{ kHz}$ 。跟踪干扰为窄带高斯噪声, 其带宽  $W_{ch} = 200 \text{ kHz}$ 。能量检测法检测门限值  $\gamma$  由给定的虚警概率及式(23)给出。仿真中的信干比为通信信号与跟踪干扰平均功率比, 通信信号功率保持不变, 而改变干扰信号功率。通信信号中的训练序列采用长度为  $1000 \text{ bit}$  的 BPSK 信号。信噪比设置为  $R_{SN} = 10 \text{ dB}$ 。

### 4.1 能量检测法不同虚警率对系统检测概率的影响

对在不同空闲信道检测的虚警率条件下的跟踪干扰信号进行检测, 仿真结果如图 2 所示。图中  $M=4$ , 即通信信号连续 4 次改变信道后都遭受干扰, 才确认跟踪干扰的存在。

由图 2 可见, 空闲信道检测的虚警率门限  $P_{fa}$  越高, 系统检测概率  $P_d$  就越低, 这是因为虚警率门限增高时, 对空信道检测概率会降低, 从而降低最终检测概率。检测概率在一定区间的信干比上随信干比增加而单调递减,

信干比增加到一定数值后,检测概率仿真值与理论值偏差增大。这是因为信干比提高且通信信号功率不变时,干扰功率相应减小,干噪比减小,信道噪声的影响增大,所以对干扰信号的检测概率误差会增大,并且连续检测次数较多,最终的检测概率是多次检测概率的乘积,从而使得最终的检测概率仿真值与理论值偏差变大。

#### 4.2 检测次数不同时系统检测概率

图3给出了虚警率 $P_{fa}$ 一定时,检测次数 $M$ 不同时,检测概率 $P_d$ 和信干比的曲线。从图中可看出,随着信道改变次数增加,系统的检测概率有所下降,这是因为单次干扰检测的概率小于1,随着检测次数增加,连续检测到有干扰的概率下降,但将干扰判为跟踪干扰的可信度更高。由于在仿真中设置通信信号功率不变,故当信干比低于-2.4 dB时,干扰功率较大,干噪比较大,信道噪声对检测性能影响较小,检测概率仿真值与理论值基本相符,信干比在-2.4~-0.4 dB之间时,由于干扰功率较小,干噪比较小,信道噪声对检测性能影响增大,检测概率仿真值随信干比减小下降较快,信干比大于-0.4 dB时,干扰功率过小,干扰淹没在信道噪声中,系统难以检测到干扰。

从检测的最终目的考虑,既要求有较高的检测概率,同时又要求较多的检测次数来确保将干扰判为跟踪干扰更可信。由图3可知,当信干比较小(小于-2.4 dB),检测次数 $M$ 较大时,检测概率仍较大,可满足需求。

## 5 结论

本文根据跟踪干扰随通信信号频率变化而变化的特征,提出了一种检测跟踪干扰的方法,总的思路是无线通信系统选用无干扰信道进行通信,建立通信后立即受扰,多次改频到无干扰信道后均立即受扰,即可判断为受到跟踪干扰。文中详细介绍算法步骤后,对算法的理论检测性能进行了推导。仿真结果表明,高虚警率下,空闲信道检测性能较差,并对系统检测概率影响较大;信道改变次数越多,将检测出的干扰认定为跟踪干扰的可信度越高,但检测概率越低;在低信干比条件下,即干扰功率较大时,仿真检测概率与理论值较为符合,在高信干比条件下,干扰功率较小时,检测性能受信道噪声影响较大。考虑到实际应用中,敌方干扰功率一般比通信信号功率大许多,本文的理论分析具有较好的参考意义。未来的工作重点主要在于不同信道条件下的跟踪干扰检测性能,以及跟踪干扰时延对检测性能的影响。

#### 参考文献:

- [1] 姚富强. 通信抗干扰工程与实践[M]. 北京:电子工业出版社, 2012. (YAO Fuqiang. Communication anti-jamming engineering and practice[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2012.)
- [2] EKEN F. Use of antenna nulling with frequency-hopping against the follower jammer[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991,39(9):1391-1397.
- [3] HASSAN A A,HERSHEY J E,SCHROEDER J E. On a follower tone-jammer countermeasure technique[J]. IEEE Transactions on Communcation, 1995,43(234):754-756.
- [4] KO C C,NGUYEN-LE H,HUANG L. ML-based follower jamming rejection in slow FH/MFSK systems with an antenna array[J]. IEEE Transactions on Communcation, 2008,56(9):1536-1544.

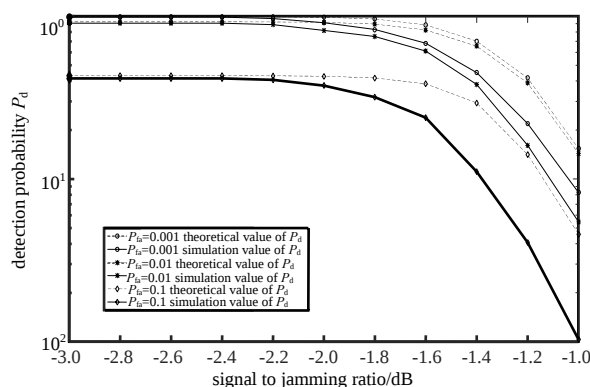


Fig.2 Relation between the probability of follower jamming detection and signal to jamming ratio with different values of  $P_{fa}$

图2 不同虚警率下,跟踪干扰检测概率随信干比变化曲线( $M=4$ )

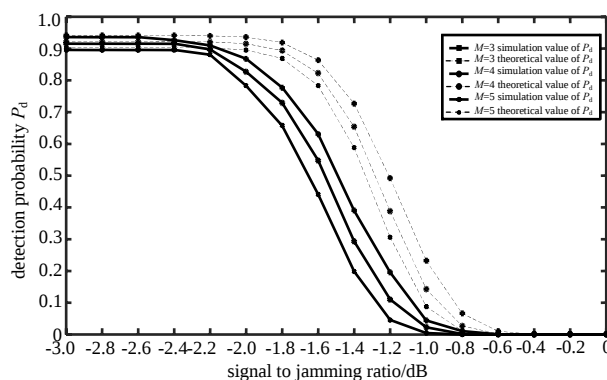


Fig.3 Relation between the probability of follower jamming detection and signal to jamming ratio with different values of  $M$

图3 连续改变 $M$ 次信道,跟踪干扰检测概率随信干比变化曲线( $P_{fa}=0.01$ )

- [5] KIM C, NO J S, PARK J, et al. Anti-jamming partially regular LDPC codes for follower jamming with Rayleigh block fading in frequency hopping spread spectrum[C]// International Conference on Information and Communication Technology Convergence. [S.l.]:IEEE, 2016:583-587.
- [6] 张静,徐以涛,丁国如,等. 基于信道质量优化的动态频谱抗干扰[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(1):65-70. (ZHANG Jing, XU Yitao, DING Guoru, et al. Dynamic spectrum anti-jamming based on channel quality optimization[J]. Terahertz Journal of Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):65-70.)
- [7] YAN Yunbin, QUAN Houde, LIU Ying. Automatic recognition of follower jamming of frequency-hopping communication[J]. IEEE International Conference on Communication Technology, DOI:10.1109/ICCT.2012.6511268.
- [8] 闫云斌,田庆民,杨真,等. 噪声跟踪干扰检测算法性能分析[J]. 信号处理, 2014,30(10):1165-1170. (YAN Yunbin, TIAN Qingmin, YANG Zhen, et al. Performance analysis of detection algorithm for follower noise jamming[J]. Journal of Signal Processing, 2014,30(10):1165-1170.)
- [9] HANSSON A, SENIOR J N, WIKLUNDH K. Performance analysis of frequency-hopping ad hoc networks with random dwell-time under follower jamming[C]// Military Communications Conference. Tampa, FL, USA:IEEE, 2015:848-853.
- [10] KAY S M. 统计信号处理基础-估计与检测理论[M]. 罗鹏飞,张文明,刘忠,等,译. 北京:电子工业出版社, 2011. (KAY S M. Statistical signal processing fundamentals-estimation and detection theory[M]. Translated by LUO Pengfei, ZHANG Wenming, LIU Zhong, et al. Beijing:Electronic Industry Press, 2011.)
- [11] 蒋锦新,应新瑜. 信号检测与估计理论[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1986. (JIANG Jinxin, YING Xinyu. Signal detection and estimation theory[M]. Xi'an, China:Northwestern Telecommunication Engineering Institute Press, 1986.)
- [12] POISEL R A. 现代通信干扰原理与技术[M]. 楼才义,王国宏,张春磊,等,译. 北京:电子工业出版社, 2005. (POISEL R A. Principles and techniques of modern communication interference[M]. Translated by LOU Caiyi, WANG Guohong, ZHANG Chunlei, et al. Beijing:Electronics Industry Press, 2005.)

#### 作者简介:



夏 志(1993-), 男, 江苏省涟水县人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信抗干扰. email:389959383@qq.com.

牛英滔(1978-), 男, 济南市人, 高级工程师, 主要研究方向为认知无线电、无线通信抗干扰.

韩 晨(1993-), 男, 山东省滨州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信抗干扰.

陈建忠(1962-), 男, 江苏省泰兴市人, 研究员, 主要研究方向为无线通信抗干扰.

逢天洋(1993-), 男, 哈尔滨市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信抗干扰.

\*\*\*\*\*

## 2019 年中国通信学会和中国宇航学会活动计划

1. 第十五届卫星通信学术年会(3月7日北京)
2. 第四届小卫星技术与应用研讨会(4月北京)
3. 第十届卫星通信产业发展研讨会(6月南京)
4. 第三届相控阵天线技术研讨会(7月北京)
5. 第四届航空通信与卫星应用研讨会(5月成都)
6. 第五届中国海上卫星应用研讨会(9月地点待定)

联系人: 翟 峰 手机: 13901128671(可加微信)